

DOI: doi.org/10.21009/03.SNF2017.02.EPA.11

ANALISIS DAMPAK FLARE TIPE X SEPTEMBER 2014 TERHADAP SISTEM NAVIGASI DAN POSISI BERBASIS SATELIT DARI PENGAMATAN GISTM KUPANG

Asnawi Husin^{1,a)}, Tiar Dani^{1,b)}, Ali Warsito^{2,c)},

¹*Pusat Sains Antariksa LAPAN, Jl. Dr Junjuran 133, Bandung 40173*

²*Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Jl. Adisucipto, Penfui-Kupang*

Email: ^{a)}asnawi@lapan.go.id, ^{b)}tiar.dani@lapan.go.id, ^{c)}isaac_alie@yahoo.com

Abstrak

Perubahan kerapatan elektron di lapisan ionosfer dapat menyebabkan pembelokan sinyal satelit karena lapisan ionosfer bersifat medium dispersif pada frekuensi radio satelit. Kondisi kerapatan elektron dan ion di lapisan ionosfer meningkat akibat adanya peningkatan aktivitas matahari dan akan berdampak pada propagasi gelombang radio dari satelit ke penerima, yaitu dapat menyebabkan perlambatan (delay). Delay tersebut berdampak pada pergeseran tingkat akurasi pengukuran posisi pada sistem satelit navigasi GNSS (Global Navigation Satellite System). Pada tanggal 10 September 2014 terjadi peristiwa flare X1.6 pada pukul 17:45 UT yang disertai dengan pelepasan masa korona (CME). Akibatnya, pada tanggal 12 September 2014 terjadi badai geomagnet kategori kuat. Respon ionosfer terhadap badai geomagnet tersebut telah menyebabkan badai positif karena terjadi peningkatan kandungan elektron. Dari hasil pengamatan TEC menggunakan GISTM Bandung dan Kupang terjadi peningkatan dengan simpangan maksimum TEC terhadap kondisi tenangnya mencapai 28 TEC Unit dari pengamatan Bandung dan mencapai 35 TEC Unit dari pengamatan Kupang. Frekuensi kritis lapisan F ionosfer (foF2) juga mengalami peningkatan saat terjadi badai geomagnet dengan kenaikan sekitar 4,5 MHz dari pengamatan ionosonde CADI Kupang. Hasil analisis pengukuran posisi absolute dari GPS stasiun tetap Darwin Australia saat badai geomagnet fase utama tanggal 12 September 2014 menyebabkan kesalahan vertikal mencapai lebih dari 20 meter.

Kata-kata kunci: Flare, GNSS, Ionosfer

Abstract

Rapid changes in the ionospheric electron density may cause the satellite signals disturbed, because ionosphere layer is a dispersive medium for radio satellite frequencies. Electron density and ions in the ionosphere increases with increasing of solar activity and will have an impact on the delay of the radio wave propagation from the satellite to the receiver. The delay effects to the level of accuracy of position measurement on navigation satellite systems (Global Navigation Satellite System, GNSS). On September 10, 2014, a class X1.6 of the flare was released at 17:45 UTC, accompanied by a coronal mass ejection (CME). As a result, on September 12, 2014, a strong category of geomagnetic storm occurred. The ionospheric response to the geomagnetic storms has caused a positive storm due to an increase in electron content. Based on TEC measurement by using GISTM Bandung and Kupang, there were an increase of TEC with maximum deviation reached 28 TEC Unit for Bandung station and 35 TEC for Kupang station. The critical frequency of the ionosphere F layer (foF2) also increased during

geomagnetic storms, about 4.5 MHz, taken from the ionsonde CADI at Kupang station. Results show the analysis of the absolute position of GPS measurements from fixed GPS station at Darwin Australia during the main phase of geomagnetic storm on September 12, 2014 has caused vertical errors reached more than 20 meters.

Keywords: Flare, GNSS, Ionosphere.

PENDAHULUAN

Lapisan ionosfer adalah bagian atmosfer yang banyak mengandung ion dan elektron. Ion dan elektron tersebut terbentuk dari proses fotoionisasi konstituen di atmosfer dengan radiasi sinar X, ekstrim ultra violet (EUV) dan partikel bermuatan dari matahari. Perubahan kerapatan elektron di ionosfer dapat menyebabkan pembelokkan sinyal satelit karena lapisan ionosfer bersifat medium dispersif pada frekuensi radio satelit. Pada kondisi kerapatan elektron dan ion di lapisan ionosfer meningkat akibat adanya peningkatan aktivitas matahari, maka berdampak pada propagasi gelombang radio satelit yaitu terjadi perlambatan (delay). Delay tersebut berdampak pada pergeseran tingkat akurasi pengukuran posisi pada sistem satelit navigasi GNSS (Global Navigation Satellite System). Selain peningkatan jumlah kandungan elektron, fenomena lain di ionosfer adalah gelembung plasma. Fenomena ini adalah penipisan plasma yang sering terjadi setelah matahari terbenam hingga malam hari terutama ionosfer di wilayah lintang rendah ekuator. Efek rekombinasi ion setelah matahari terbenam dan ketidakstabilan Rayleigh Taylor di bagian bawah lapisan F [1] serta adanya gelombang gravitasi dipercaya sebagai pemicu gelembung plasma. Ketidakstabilan tersebut menyebabkan osilasi kerapatan elektron ionosfer bergerak ke atas [2]. Pada saat kerapatan ionosfer berkurang maka seperti ada gelembung yang terangkat ke atas karena lapisan ionosfer di atasnya lebih rapat. Fenomena gelembung plasma pada sinyal satelit dikenali sebagai sintilasi ionosfer. Sintilasi ionosfer menyebabkan fluktuasi modulasi amplitudo dan fasa sinyal. Kemunculan sintilasi ionosfer berpotensi menyebabkan beberapa gangguan pada sinyal GNSS diantaranya lost of lock yaitu penerima kesulitan mengunci sinyal dari satelit, seolah terhalang sehingga berkurangnya akurasi pengukuran posisi navigasi.

Gangguan perubahan kerapatan elektron di ionosfer tidak terlepas dari pengaruh aktivitas matahari. Fenomena aktivitas matahari yang berdampak pada perubahan kerapatan ionosfer salah satunya adalah kilatan di matahari atau flare. Flare matahari adalah pelepasan partikel energi tinggi ($10^{19} - 10^{25}$ Joule) yang berasal dari daerah aktif di matahari yaitu kelompok bintik matahari. Saat terjadi flare maka emisi sinar X dan ultra violet akan meningkat sehingga kerapatan elektron di ionosfer juga mengalami perubahan. Makalah ini membahas dampak flare kelas X yang terjadi pada September 2014 terhadap akurasi posisi berbasis GNSS dari pengamatan GISTM (GPS Ionospheric TEC and Scintillation Monitor) stasiun Bandung, Kupang dan GPS Darwin Australia. Analisis dilakukan pada saat sebelum dan saat fasa utama pemulihan badai geomagnet untuk mengetahui tingkat perubahan gangguan akurasi pengukuran posisi navigasi satelit. Hasil studi ini dapat memberikan penjelasan dan rekomendasi untuk memitigasi dampak cuaca antariksa bagi pengguna GPS/ GNSS.

DATA DAN METODE PENELITIAN

Data parameter ionosfer yang digunakan adalah data jumlah kandungan elektron (TEC, *total electron content*) dan data indeks amplitudo sintilasi ionosfer (S4). Elektron di lapisan ionosfer mempengaruhi penjalaran sinyal satelit GNSS yang diterima di bumi di kenal sebagai tunda (delay) ionosfer [3], yaitu mempercepat sinyal pembawa (fasa) dan memperlambat sinyal kode. Pada sinyal satelit GNSS, nilai tunda ionosfer merupakan fungsi dari indeks refraksi lapisan ionosfer. Indeks refraksi ionosfer bergantung pada jumlah kandungan elektron sehingga tunda ionosfer bergantung pada jumlah kandungan elektron sepanjang lintasan pandangan (line of sight, LOS) antara penerima dengan satelit GNSS dapat ditulis sebagai [4]:

$$- t_p = t_g = \frac{40,3}{f^2} * TEC \quad (1)$$

Dengan t_p dan t_g masing-masing adalah delay fase (gelombang pembawa, carrier) dan delay kode (group delay). TEC adalah integral kerapatan electron sepanjang LOS setelit ke penerima yaitu jumlah kandungan electron setiap meter persegi (m^2) sedangkan f adalah frekuensi radio dari GNSS. Dari persamaan 1, bahwa tunda ionosfer adalah fungsi dari TEC dan frekuensi. Satuan TEC adalah TEC Unit (TECU) sehingga untuk 1 TECU akan menyebabkan tunda pada sinyal kode pseudorange sebesar 0,163 meter dan 0.267 meter [5] pada masing-masing frekuensi L1 dan L2 sinyal GNSS. GISTM akan merekam data TEC dan sintilasi ionosfer dengan resolusi 50Hz. Proses mendapatkan data TEC siap analisis dari GISTM dijelaskan pada [6]. Sedangkan data sintilasi ionosfer dari GISTM adalah data indeks amplitude sintilasi (S4).. Dengan data S4 maka informasi gangguan fenomena gelombang plasma ionosfer dapat diamati pada rentang waktu tertentu. Pada prinsipnya indeks sintilasi (S4) diturunkan dari intensitas sinyal yang diterima oleh penerima satelit GNSS karena fenomena gelombang plasma akan menyebabkan perubahan daya sinyal satelit GNSS. Proses mendapatkan data S4 siap analisis dari pengamatan menggunakan GISTM dijelaskan di [7].

Data TEC dan indeks sintilasi ionosfer diperoleh dari pengamatan GISTM di Kupang dan di Bandung serta juga digunakan data frekuensi kritis lapisan F ionosfer (f_oF2) yang diamati menggunakan ionosonda CADI di Kupang. Data tersebut digunakan untuk analisis variasi ionosfer dalam merespon kemunculan flare matahari dan badai geomagnet. Analisis perubahan parameter ionosfer (TEC dan f_oF2) dilakukan dengan membandingkan trend variasi jam terhadap variasi tenang. Variasi tenang yaitu nilai median dihitung dengan persamaan matematis:

$$M = \frac{\sum_{t=1}^{27} P(t)}{n} \quad (2)$$

Dengan M adalah median bergerak 27 hari, $P(t)$ adalah fungsi parameter terhadap waktu (TEC dan f_oF2) dan n adalah jumlah data.

Selain itu digunakan data Flare yang diperoleh dari <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov> serta data badai geomagnet Dst (*Disturbance Storm time index*) yang diperoleh dari pusat data internasional (WDC, world data center for geomagnetism Kyoto) (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>). Flare adalah kilatan matahari yang menghasilkan semburan radiasi di seluruh spektrum gelombang elektromagnetik, dari sinar x-ray hingga sinar gamma. Berdasarkan tingkat kecerahan sinar x yang dihasilkan yaitu panjang gelombang berkisar 1-8 Angstrom, maka flare dibedakan menjadi 3 kategori. Flare kelas X adalah flare terbesar yang akan menyebabkan gangguan komunikasi terputus sama sekali yang dikenal sebagai *radio black out* dan flare ini akan menyebabkan badai geomagnet kuat berdurasi lama. Flare kelas M, yaitu kelas menengah, juga dapat menyebabkan gangguan komunikasi radio terutama di daerah kutub bumi. Kelas terkecil adalah flare kelas C. Emisi partikel berenergi tinggi yang terbawa oleh angin surya (*solar wind*) saat terjadi flare dan apabila diikuti juga dengan lontaran masa korona (*Coronal Mass Ejection, CME*) yang mengarah ke bumi dapat menyebabkan badai geomagnet. CME sendiri adalah erupsi medan magnet matahari dan lontaran plasma yang bergerak masuk ke dalam ruang antar planet [8]. Secara sederhana badai geomagnet adalah gangguan pada magnetosfer bumi akibat adanya partikel energi tinggi yang dibawa angin surya dan atau awan magnetik saat terjadi CME, yang menyebabkan perubahan sabuk radiasi, arus cincin (*ring current*). Selanjutnya akan terkoneksi dengan lapisan ionosfer yang menyebabkan terjadinya perubahan kerapatan elektron di ionosfer, sehingga hal ini memicu terjadinya badai ionosfer dan diikuti juga dengan pemanasan lapisan ionosfer dan atmosfer atas (thermosfer) [9]. Perubahan kerapatan elektron tersebut apabila terjadi peningkatan elektron disebut sebagai badai positif sedangkan sebaliknya disebut sebagai badai negatif, dan tidak jarang dijumpai badai positif dan negatif muncul bersamaan tetapi pada lintang yang berbeda [10]. Dengan demikian kejadian badai geomagnet dan badai ionosfer tidak terlepas dari adanya CME, medan magnet antar planet (*IMF, Interplanetary Magnetic Field*) [11]. Peningkatan energi yang di transfer dari angin surya dan IMF ke dalam magnetosfer menunjukkan intensifikasi arus cincin [12]. Sedangkan arus cincin tersebut dapat di monitor dari pengamatan indeks gangguan geomagnet yaitu Dst index. Untuk daerah ekuator seperti Indonesia, informasi badai geomagnet dapat dilihat dari perubahan indeks Dst tersebut, karena indeks ini merupakan nilai rerata medan

magnet bumi (komponen H) dari beberapa titik pengamatan di lintang rendah. Intesitas badai dan lama durasi badai yang teramati dapat di kwantitasi berdasarkan indeks Dst ditunjukkan pada table 1:

Tabel 1. Intensitas badai berdasarkan nilai indeks Dst

| Intensitas Badai | Dst (nT) | Bz (nT) | Durasi (Jam) |
|-------------------------|-----------------|----------------|---------------------|
| Kuat | -100 | -10 | 3 |
| Sedang | -50 | -5 | 2 |
| Lemah | -30 | -3 | 1 |

Terdapat tiga fase pembentukan badai geomagnet, yaitu fase awal, fase utama dan fase pemulihan. Pada fase utama, nilai indeks Dst turun secara drastis (negatif) hingga ratusan nano tesla. Nilai negative yang turun drastis pada fase ini mengindikasikan terbentuknya arus cincin dan akan berlangsung mulai dari setengah jam hingga beberapa jam. Berikutnya dalam waktu puluhan jam hingga satu minggu, perlahan nilai Dst akan kembali ke level normal yang mengindikasikan arus cincin mulai menghilang dan di kategorikan sebagai fase pemulihan [13].

Untuk analisis kesalahan pengukuran posisi absolut GNSS digunakan data IGS (*International GNSS Service*) <https://igsb.jpl.nasa.gov> dengan mengambil stasiun Darwin Australia. Teknik PPP (*Pierce Point Positioning*) digunakan pada penentuan posisi absolut GNSS saat terjadi badai geomagnet [14], [15].

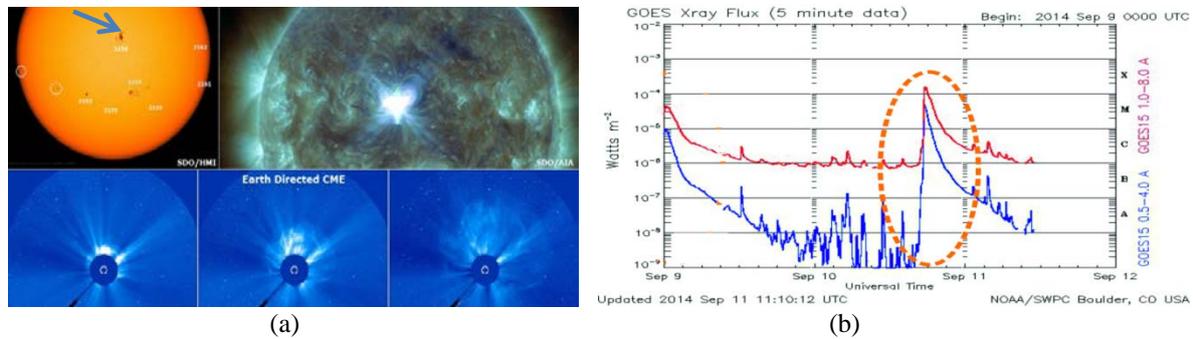
HASIL DAN PEMBAHASAN

Flare kelas X1.6 terlepas dari matahari dan langsung mengarah ke bumi pada tanggal 10 September 2014 pada pukul 17:45 UT. Flare ini berasal dari daerah aktif NOAA2158 matahari yang disertai lontaran massa CME. Gambar 1a, menunjukkan daerah aktif 2158 bintik matahari (tanda panah) dan evolusi lontaran masa dari CME yang menyertai flare tersebut (panel bawah). Flare tersebut telah menyebabkan lonjakan energi fluk sinar x mencapai 10^{-4} Watts/ m² pada skala 1-8 A dari pengamatan satelit GOES, seperti ditunjukkan pada Gambar 1b, (garis lingkaran putus-putus), sehingga dikategorikan dalam kelas X.

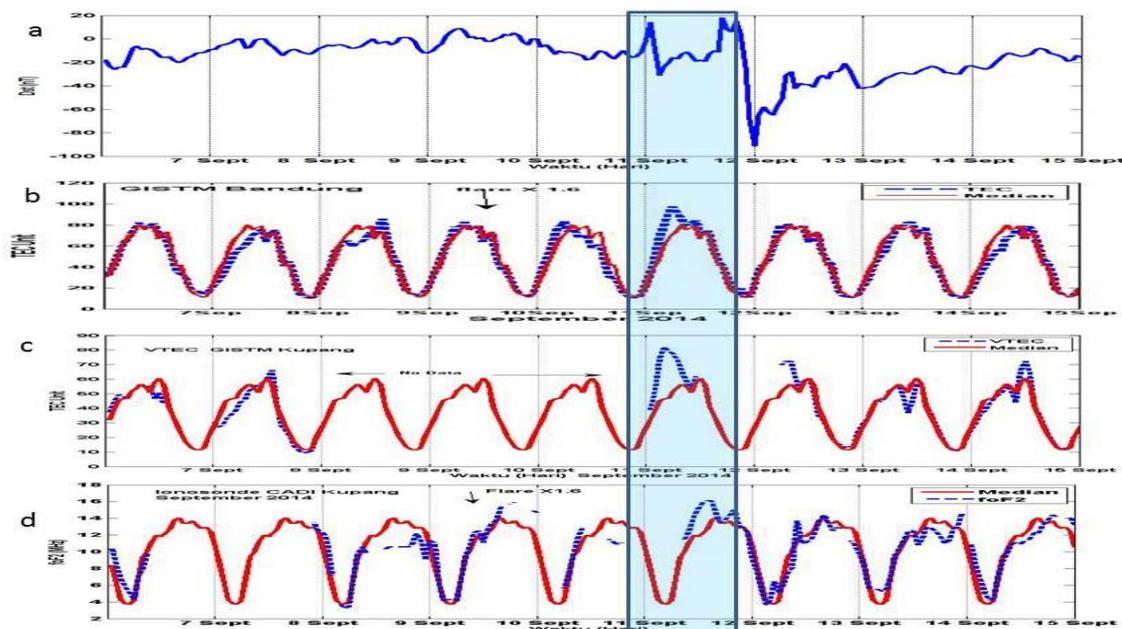
Lontaran massa CME yang mengikuti kemunculan flare pada tanggal 10 September 2014 tersebut mengarah ke bumi dengan kecepatan sekitar 1492 km/ detik dan disertai semburan emisi radio tipe II dan tipe IV serta semburan radio panjang gelombang 10 cm. Sekitar dua hari kemudain, terjadi badai geomagnet skala kuat yaitu pada tanggal 12 September 2014. Badai geomagnet yang terjadi diamati dengan indeks Dst dari tanggal 7 hingga 15 September 2014 ditunjukkan pada Gambar.2 (a). Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa efek pertama CME diterima di Bumi pada tanggal 11 September pukul 23:47 UT sebagai *sudden commencement* (SC) yaitu terjadi lonjakan positif, Tahap ini adalah fase awal badai geomagnet. Efek CME kedua di Bumi terjadi pada 12 September 2014 pukul 15:57 dengan kecepatan angin matahari melonjak dari 400 km/detik hingga 6200 km/ detik yang diikuti fasa utama badai pada 24 jam berikutnya.

Respon ionosfer terhadap badai geomagnetik yang terjadi pada 12 September 2014 menyebabkan badai positif karena terjadi peningkatan kandungan elektron. Hal ini dapat dilihat dari hasil pengamatan TEC menggunakan GISTM di Bandung dan di Kupang. Pada Gambar. 2(b), pengamatan TEC dari tanggal 7 hingga 15 September menggunakan GISTM di Bandung menunjukkan peningkatan TEC terhadap nilai median bulannya pada saat terjadi badai geomagnet tanggal 12 September. Kenaikan nilai TEC juga ditunjukkan pada Gambar 2(c) dari pengamatan GISTM di Kupang. Simpangan maksimum TEC terhadap kondisi tenang (median bulanan) saat terjadi badai geomagnet mencapai 28 TEC Unit dari pengamatan di Bandung dan mencapai 35 TEC Unit dari pengamatan di Kupang. Frekuensi kritis lapisan F ionosfer (foF2) juga mengalami peningkatan saat terjadi badai geomagnet. Hasil pada Gambar 2(d) menunjukkan variasi frekuensi kritis lapisan F ionosfer dari pengamatan ionsonde CADI di Kupang dari tanggal 7 hingga 15 September 2014 dengan kenaikan sekitar 4,5 MHz. Mekanisme yang mungkin dapat menyebabkan terjadinya badai positif pada peristiwa badai 12 September 2014 diantaranya adalah pergerakan plasma ke atas.

Ketika medan listrik (E) yang bergerak ke arah timur berada tegak lurus terhadap medan magnet bumi (B), maka akan timbul gaya keatas ($\text{drift } E \times B$). Medan listrik (E) dalam arah timur tersebut dapat berasal dari dua sumber. Salah satunya adalah penetrasi konveksi medan listrik dari magnetosfer ke ionosfer lintang rendah saat terjadi badai geomagnet dan sumber lainnya adalah induksi arus dynamo yang mengikuti perubahan sirkulasi termosfer akibat enjeksi energi di daerah kutub Bumi [16].



Gambar 1.(a) Kejadian Flare matahari, diikuti dengan CME pada 10 September 2014 dan (b) Grafik lonjakan energi fluks sinar-X pada skala 1 – 8 A mencapai 10^{-4} W/m^2 dikategorikan pada kelas X hasil rekaman satelit GOES pada saat terjadi flare tanggal 10 September 2014. Sumber: <http://www.theeventchronicle.com/science/powerful-x1-6-solar-flare-earth-facing-cme>

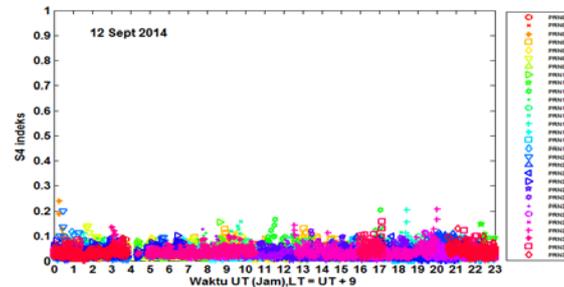


Gambar 2. Respon ionosfer saat terjadi badai geomagnet, data diambil dari tanggal 7-15 September. Gambar (a) adalah indeks Dst, (b) TEC Bandung, (c), TEC Kupang dan (d) adalah foF2 Kupang.

Kemunculan sintilasi ionosfer tertinggi terjadi pada bulan-bulan ekuinoks seperti bulan September. Terminator matahari pada bulan tersebut sejajar dengan meridian magnetik sehingga meningkatkan gangguan gelembung plasma yang berujung meningkatnya gangguan sintilasi ionosfer [17]. Namun demikian pada saat badai geomagnet kemunculan sintilasi justru menghilang [18][19][20].

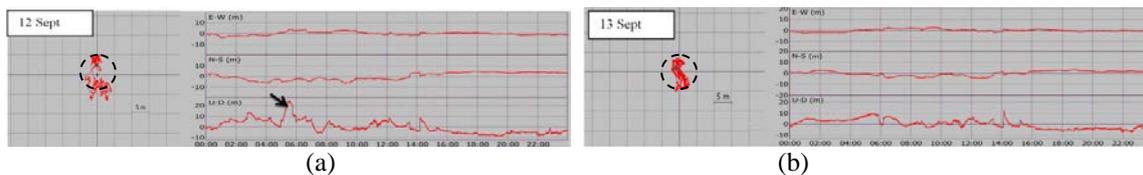
Hasil pengamatan sintilasi dari GISTM Kupang pada saat badai geomagnet fase utama tanggal 12 September 2014 memperlihatkan sintilasi tidak terjadi seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Semua sinyal satelit visible (PRN) yang diterima penerima GNSS yang dibedakan dengan warna dan tanda

□▲●▼×*. Nilai indeks amplitude sintilasi (S4) nya dibawah 0,5. yang mengindikasikan tidak ada sinyal satelit yang mengalami sintilasi ionosfer. Analisis hasil pengukuran posisi GPS frekuensi ganda stasiun tetap Darwin Australia saat badai geomagnet fase utama tanggal 12 September 2014 dan saat badai pada fase pemulihan tanggal 13 September 2014 ditunjukkan masing-masing pada Gambar 4a dan Gambar 4b.



Gambar 3. Sintilasi ionosfer tidak terjadi saat badai geomagnet pada fase utama 12 September 2014 dari pengamatan GISTM di Kupang

Grafik pada Gambar 4a, kesalahan tertinggi adalah kesalahan vertikal mencapai lebih 20 meter berbanding saat tidak terjadi badai yaitu tanggal 13 September (Gambar 4b). Sedangkan kesalahan utara-selatan (N-S) dan barat-timur (E-W) tidak signifikan baik pada saat badai geomagnet berlangsung maupun saat badai sudah mulai reda. Pada panel sebelah kiri Gambar 4a menunjukkan *ground track* posisi selama satu hari pengukuran dengan jejak yang lebih melebar (lingkaran putus-putus) ketika terjadi badai geomagnet tanggal 12 September 2014 berbanding saat badai geomagnet mulai pemulihan tanggal 13 September 2014 seperti ditunjukkan pada Gambar 4b.



Gambar 4. Kesalahan pengukuran posisi GPS saat fasa utama badai geomagnet 12 September 2014 dan saat fase pemulihan 13 September 2014 dari GPS stasiun tetap Darwin Australia..

Mekanisme yang mungkin dapat menyebabkan terjadinya badai positif pada peristiwa badai 12 September 2014 diantaranya adalah penetrasi konveksi medan listrik dari magnetosfer ke ionosfer lintang rendah sehingga terjadi pergerakan plasma. Pada saat arus medan listrik (E) yang masuk bergerak ke arah timur dengan posisi berada tegak lurus terhadap medan magnet bumi (B), maka membangkitkan gaya keatas ($\text{drift } E \times B$). Kemungkinan lainnya adalah induksi arus dinamo yang mengikuti perubahan sirkulasi termosfer akibat injeksi energi di daerah kutub Bumi ketika penetrasi badai geomagnet. Hasil analisis pengukuran posisi absolut dari GPS stasiun tetap Darwin Australia saat badai geomagnet fase utama tanggal 12 September 2014 menyebabkan kesalahan vertikal mencapai lebih 20 meter. Sedangkan kesalahan utara-selatan (N-S) dan barat-timur (E-W) tidak signifikan baik pada saat badai geomagnet berlangsung maupun saat badai sudah mulai reda. Sebagai rekomendasi, pengguna GPS/ GNSS harus memperhatikan pengukuran saat terjadi gangguan cuaca antariksa ekstrim. Informasi cuaca antariksa dapat diperoleh dari prediksi cuaca antariksa yang dibagikan oleh LAPAN sebagai lembaga yang kompeten dalam bidang tersebut.

SIMPULAN

Kejadian Flare kelas X1.6 pada tanggal 10 September 2014 pukul 17:45 UT disertai lontaran masa koronal matahari, mengarah ke bumi dengan kecepatan sekitar 1493 km/detik. Dengan kecepatan tersebut maka terjadi badai geomagnetik kategori kuat dua hari kemudian yaitu tanggal 12 September 2014. Mekanisme gangguan di ionosfer berhubungan dengan kejadian badai geomagnetik

dua hari setelah kemunculan lontaran massa korona matahari. Selanjutnya diikuti respon di ionosfer dengan peningkatan kandungan elektron ionosfer yang dikenal sebagai badai positif. Indikasi badai positif ini dapat dilihat dari hasil pengamatan TEC menggunakan GISTM di Bandung dan di Kupang. Simpangan maksimum TEC terhadap kondisi tenangnya (median bulanan) saat terjadi badai geomagnet mencapai 28 TEC Unit dari pengamatan di Bandung dan mencapai 35 TEC Unit dari pengamatan di Kupang. Frekuensi kritis lapisan F ionosfer (foF2) juga mengalami peningkatan saat terjadi badai geomagnet dengan kenaikan sekitar 4,5 MHz dari pengamatan ionosonde CADI di Kupang. Pengaruh badai tersebut juga menyebabkan kesalahan vertikal pengukuran dengan GNSS mencapai lebih 20 meter dari pengamatan GPS stasiun tetap Darwin. Informasi kejadian Flare, lontaran massa koronal, badai geomagnetik dan gangguan kerapatan elektron di ionosfer merupakan informasi cuaca antariksa yang diperlukan untuk mitigasi dampaknya bagi pengguna komunikasi radio dan pengukuran posisi dan navigasi berbasis satelit.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Team Skaling Interpretasi Data (TSID) Pusat Sains Antariksa LAPAN, atas ketersediaan data Ionosonda CADI Kupang. Juga kepada Universitas Nusa Cendana Kupang atas kerjasama pengamatan, IPS Australia dan IGS untuk penggunaan data GNSS.

REFERENSI

- [1] Burke W, et al., "Longitudinal Variability of Equatorial Plasma Bubbles Observed by DMSP and ROCSAT-1," *J Geophysical Research*, 109, (A12301), 2004.
- [2] Li G, et al., "Effect of magnetic activity on plasma bubbles over equatorial low-latitude regions in East Asia," *Ann. Geophys.*, vol. 27, pp. 303–312, 2009.
- [3] Kintner, P. M and Ledvina, B. M. "The ionosphere, radio navigation and global navigation satellite systems," *Adv. Space Res*, Vol. 35, pp. 788-811, 2005.
- [4] Mannucci, A. J. et al., "A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements," *Radio Sci.*, 33, pp.565-582, 1998.
- [5] Klobuchar, J. A, "Ionospheric effects on GPS, in *Global Positioning System: Theory and Applications*," *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, Washington, DC, 1996, pp. 485 – 515,.
- [6] Asnawi dan Jiyo, "Analisis Hasil Awal Pengamatan Sintilasi Ionosfer di Atas Manado-Tomohon", *Proc Workshop Riset Cuaca Antariksa dan Peluang Pemanfaatannya, Manado*, ISSN:2355-388X, p.32-36. 2013.
- [7] Asnawi, et al., "Analisis Hasil Awal Pemantauan Kandungan Elektron Total dan Sintilasi Ionosfer di Atas Kupang", *Proc Workshop Riset Cuaca Antariksa dan Peluang Pemanfaatannya, Kupang*, ISSN:2355-388X, p.64-70, 2013.
- [8] Cremades, H., et al., "Properties of structured coronal mass ejections in solar cycle 23," *Adv. Space Res*, 38, pp. 461–465, 2006.
- [9] Buonsanto, M. J, "Ionospheric storms- a review, " *Space Sci. Rev*, 88, pp.563–601, 1999.
- [10] Maruyama. T, et al., "Ionospheric Storm and Variation of Total Electron Content," *J. National Institute of Information and Communications Technology*, Vol.56 No.1-4, 2009.
- [11] Rathore, B.S, et al., "A Correlative Study of Geomagnetic Storms Associated with Solar Wind and IMF Features During Solar Cycle-23. *Int J Applied Physics and Mathematics*, vol .29, pp.149-154, 2011.

- [12] Gonzales, W. D., J. A. Joselyn, Y. Kamide, H. W. Kroehl, G. Rostoker, B. T. Tsurutani, and V. M. Vasyliunas, "What is a geomagnetic storm?", *J. Geophys. Res.*, 99, 5771-5792. 1994
- [13] Tsurutani, B. T., and W. D. Gonzalez, "The causes of geomagnetic storms during solar maximum", *Eos Trans. AGU*, 75(5), pp. 49–53, 1994.
- [14] Takasu, T. (2007). *RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning*. [Online] Available: <http://www.rtklib.com>
- [15] Takasu, T.(2011). *RTKLIB ver. 2.4.1 Manual*. [Online]. Available: http://www.rtklib.com/prog/manual_2.4.1.pdf
- [16] Fejer, B. G., et al, "Average daytime F region disturbance neutral winds measured by UARS: Initial results," *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 27, pp. 1859–1862. 2000.
- [17] Asnawi, "Analisis Statistik Kemunculan Sintilasi Ionosfer Daerah Lintang Rendah Indonesia Berdasarkan Data Pengamatan Di Stasiun Kototabang," *Majalah Sains Dan Teknologi Dirgantara*, Vol.8. No.2, pp.40-47. 2013.
- [18] Aarons, J, "The role of the ring current in the generation or inhibition of equatorial F-layer irregularities during magnetic storms, *Radio Sci*, vol.26, pp.1131-1149, 1991.
- [19] Bhattacharya, A., et al, "Effect of magnetic activity on the dynamics of equatorial F region irregularities", *J Geophysical Research* vol.107(A12), pp 14-89, 2002.
- [20] Oladipo, O. A. and T. Schüler, "Magnetic storm effect on the occurrence of ionospheric irregularities at an equatorial station in the African sector," *Annals of Geophysics*, vol 56, 5, 2013.